

色散和非线性对新型三激光器混沌通信系统的影响

李艳芳 叶会英 史燕芳

郑州大学信息工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 通过分步傅里叶算法对光纤传输模型——非线性薛定谔方程进行求解, 研究光纤的色散和非线性对新型闭环双向三激光器混沌保密通信系统的影响。分析了在色散、非线性以及色散和非线性共同作用下, 光纤传输距离对混沌信号和解调信息质量的影响。结果表明: 随着传输距离增加, 色散导致混沌信号展宽, 展宽比率也随之增大; 混沌信号同步性逐渐变差, 导致解调信息质量变差。非线性不影响混沌信号的时域波形, 但非线性与色散的共同作用, 导致混沌信号迅速变化, 混沌信号同步性迅速变差, 使解调信息质量急剧恶化。

关键词 激光器; 色散; 非线性; 分步傅里叶算法; 混沌保密通信

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.011403

Effects of Dispersion and Nonlinearity on the New Chaotic Communication System with Three-Laser

Li Yanfang Ye Huiying Shi Yanfang

College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract The optical fiber transmission model, i.e., the nonlinear Schrödinger equation, is solved by split-step Fourier algorithm to research the effects of fiber-optical dispersion and nonlinearity on a new closed-loop dual-directionally chaotic secure communication system with three lasers. The effects of the actions of dispersion, nonlinearizing, and combination action of dispersion and nonlinearity on the chaotic signal and the demodulated message quality are analyzed as the optical fiber transmission distance increases. The results show that: the dispersion leads to the broadening of chaotic signal, and the increase of broadening ratio, and reduces the synchronization performance of chaotic signal with the optical fiber transmission distance increasing, which results in the degradation of the demodulated message quality. Nonlinearity does not affect the time-domain waveform of chaotic signals, but the combination effects with dispersion make the chaotic signal change rapidly, as a result, the synchronization performance of chaotic signals varies rapidly, and the demodulated message quality sharply deteriorates.

Key words lasers; dispersion; nonlinearity; split-step Fourier algorithm; chaotic secure communication

OCIS codes 140.1540; 140.5960; 060.2330; 060.2430

1 引言

由于混沌信号具有类噪声、宽频谱、初始条件敏感、长期的不可预测性等特点, 因此以混沌信号作为载波进行保密通信成为了目前研究的热点^[1-4]。1990年, Pecora等^[5]提出混沌同步思想, 开启了人们研究混沌保密通信的大门, 此后有关混沌保密通信的研究有了很大进展: 从电路混沌系统^[6-7]到全激光混沌系统^[8], 从主-从响应两激光器同步系统^[9]到驱动-响应三激光器同步系统^[10-12], 从单向耦合同步到双向耦合同步, 其同步性和保密性逐步提高。

光纤已经成为目前通信的主要手段之一, 而基于半导体激光器的混沌通信系统与现有的光纤通信系统

收稿日期: 2013-09-03; 收到修改稿日期: 2013-10-05; 网络出版日期: 2013-12-25

作者简介: 李艳芳(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事半导体激光器混沌通信方面的研究。

E-mail: 514313210@qq.com

导师简介: 叶会英(1966—), 女, 博士, 教授, 主要从事光电测试技术、信号处理等方面的研究。

E-mail: iehyye@zzu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

有很好的兼容性,使混沌保密通信应用于光纤传输在理论上成为可能。2005年,Argyris等^[13]基于半导体激光器的激光混沌,在雅典城的商用光纤网络中实现了1 Gb/s、传输距离120 km的单向保密通信,验证了理论的可行性。但是,有关光纤双向传输的混沌保密通信系统还鲜有研究。

光纤传输过程中,光纤中的色散和非线性势必会对传输的信号产生一定的影响^[14-16],使通信质量变差。本文针对新型三激光器混沌通信系统^[11],基于Matlab平台,通过分步傅里叶算法对光纤传输模型(非线性薛定谔方程)进行求解,研究光纤中的色散和非线性对混沌信号同步性和解调信息质量的影响,并验证此双向传输混沌系统的可行性。

2 系统模型

2.1 新型三激光器混沌保密通信系统

本文基于的新型三激光器混沌通信系统^[11]由一个驱动激光器(DL)和两个参数完全相同的响应激光器(RL1和RL2)组成,两个RL通过注入DL产生的混沌驱动信号达到混沌同步。其结构如图1所示。

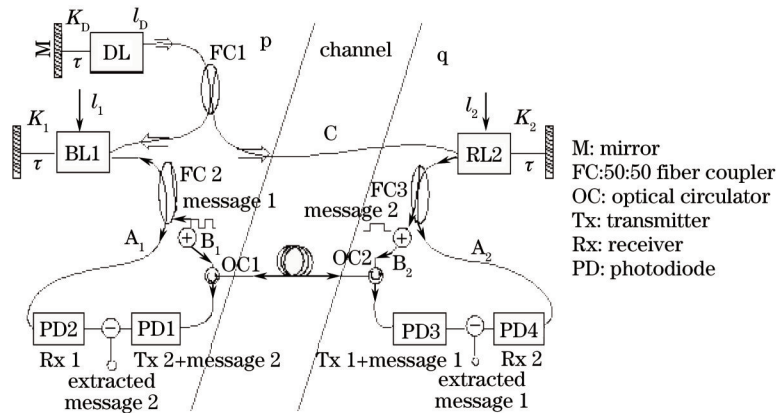


图1 三激光器混沌通信系统原理图

Fig.1 Schematic diagram for the new chaotic communication system with three lasers

RL1到RL2的信息传输过程为: message 1在p端通过混沌隐藏方式与混沌载波相混合,混合信号(Tx1+message 1)经信道B1传输到q端,通过光环行器OC2被光电探测器PD3检测到。精确控制RL2的参数使其生成与RL1高度同步的混沌波形,经光耦合器FC3被分成两部分,一部分经信道A2传到光电探测器PD4,PD3探测到的混合信号(Tx1+message 1)减去PD4探测到的本地载波(Rx2),从而恢复被隐藏的信息message 1。RL2到RL1的信息传输具有相似的过程。

由于DL和RL的参数不匹配,它们的混沌输出也不相同,窃听者即使同时截获了信道C和B1,C和B2,或B1和B2,没有匹配的RL也无法获取信息。

2.2 光纤传输模型

激光混沌信号在光纤中传输,可用非线性薛定谔方程^[10]来描述:

$$\frac{\partial E}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}E - \frac{\beta_2 j}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} - \gamma |E|^2 E = 0, \quad (1)$$

式中 $E(z,t)$ 是激光场的慢变振幅, z 是传输距离, T 是以信号脉冲群速度运动的参照系中的时间变量, α 是损耗系数(算法中可令 $\alpha=0$), β_2 是二阶色散常数, γ 是非线性Kerr效应常数。在数值仿真中,选用波长1550 nm的单模光纤($\beta_2=1 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$, $\gamma=1.5 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)^[17]。

这是一个非线性微分方程,一般情况下很难求解,但是可以通过计算机利用分步傅里叶方法进行数值求解。分布傅里叶算法的基本原理如下。

非线性薛定谔方程可写成如下形式^[18-19]:

$$\frac{\partial E}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A, \quad (2)$$

式中 \hat{D} 为色散算子, \hat{N} 为非线性算子,

$$\hat{D} = \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{j\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} \right) E, \quad (3)$$

$$\hat{N} = \gamma |E|^2. \quad (4)$$

一般来说,沿着光传输方向,色散和非线性是同时作用的,分步傅里叶方法假定在传输过程中,光场每通过一小段传输距离,色散和非线性可以分别作用,从而得到一个近似结果。

2.3 调制解调方法

一般来说,混沌通信加密方式有三种:混沌隐藏、混沌调制和混沌键控^[9]。本文采用混沌隐藏中的加法方式(另有乘法、加乘结合的方式)进行信息加密,其原理图如图2所示。

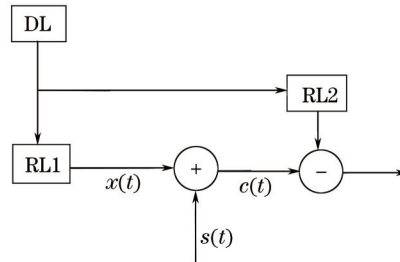


图2 混沌隐藏方式原理图

Fig.2 Schematic diagram of chaotic masking

图2中 $s(t)$ 是要传输的信息, $x(t)$ 是 RL1 产生的混沌载波, $s(t)$ 通过混沌隐藏的方式隐藏在 $x(t)$ 中生成混合信号 $s(t)+x(t)$; 在接收端, RL2 生成与 RL1 同步的混沌信号 $x'(t)$, 通过相减 $[s(t)+x(t)-x'(t)]$, 就可以解调出需要传输的信息 $s(t)$ 。RL2 向 RL1 端传输的过程与此类似。本文以 RL1 到 RL2 方向传输为例。

2.4 程序流程

程序流程图如图3所示。

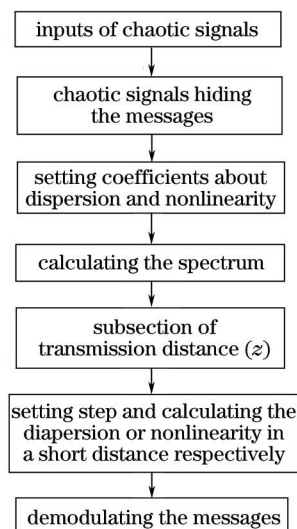


图3 程序流程图

Fig.3 Flow chart of program

3 色散和非线性对混沌信号的影响

3.1 色散对混沌信号的影响

选用 1550 nm 的单模光纤,取 $\gamma = 0$, $\beta_2 = 1 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ 。图4(a)~(c)分别是 RL1 产生的混沌信号经光纤传输 100、300、500 km 后,色散对混沌信号的影响,黑线为色散前的混沌信号,红线为色散后的混沌信号。从图中可以看出,混沌信号的幅度有所衰减,脉冲有所展宽,如图4(c)所示,当传输到 500 km 时,混沌信号已经有一定程度的失真。图5(a)~(c)是 RL1 混沌信号与其经光纤传输 100、300、500 km 时混沌信号的同步图,从图中可以看出,随着距离的增加,幅值分布越来越分散,并逐渐远离“ $y=x$ ”这条直线,所以同步性也逐渐变

差,解调信息时,就导致解调信息的质量变差。

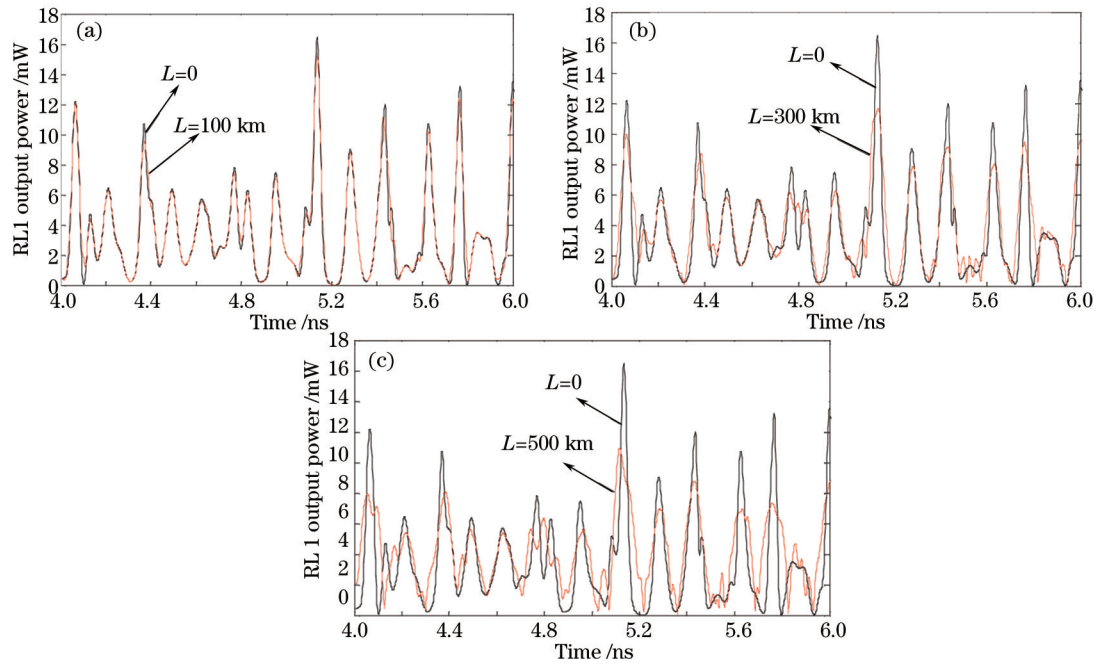


图4 传输不同距离后色散前后波形图。(a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

Fig.4 Chaotic signals with dispersion after transmission for (a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

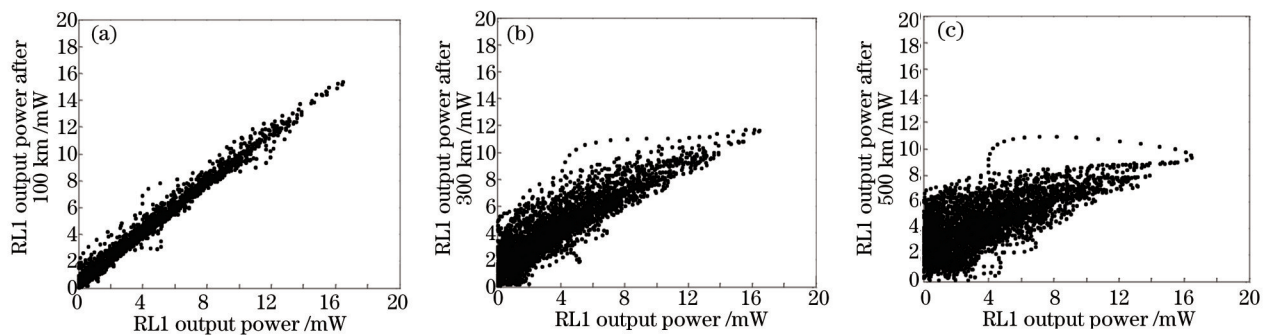


图5 传输不同距离后色散前后同步图。(a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

Fig.5 Synchronization graphs with dispersion after transmission for (a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

图6是RL1在色散的作用下混沌信号随距离变化的三维图,从图中可以更清楚地看出来混沌信号随距离的增加而逐渐衰减并且有所展宽。如图7所示,展宽比率随着距离的增加而变大,从传输距离为0时的1增大到500 km时的3.3。图8是同步误差随距离的变化情况,同步误差从5 km时的0.0006逐渐增大到500 km时的0.53。

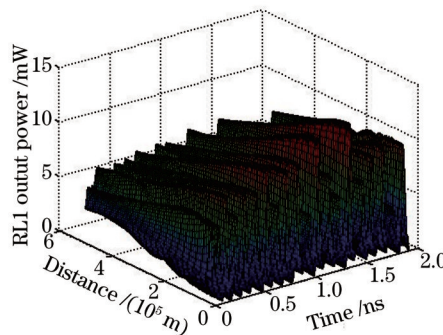


图6 色散对混沌信号影响的三维图

Fig.6 Three-dimensional image of effects of dispersion on chaotic

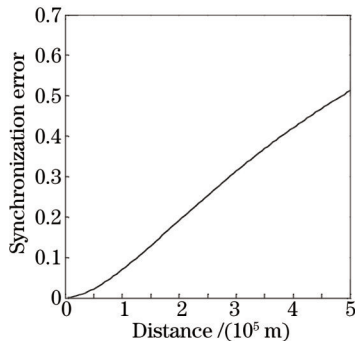


图7 同步误差随距离的变化

Fig.7 Synchronization error signals changes with distance

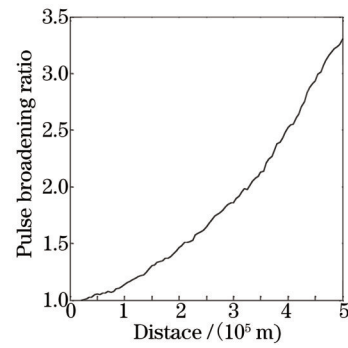


图8 展宽比率随距离的变化

Fig.8 Broadening ratio changes with distance

3.2 非线性对混沌信号的影响

取色散系数 $\beta_2 = 0$, 非线性系数 $\gamma = 1.5 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 进行数值仿真。经过多次仿真发现,非线性并不会影响混沌信号时域波形,随着距离的增加,混沌信号的时域波形并没有任何改变,如图9所示。因此,混沌信号的展宽比率不会改变,恒为1,所以非线性单独作用时,并不会影响混沌信号的同步性。因为本文采用混沌掩盖方法进行信息加密,所以也不会影响解调信息的质量。

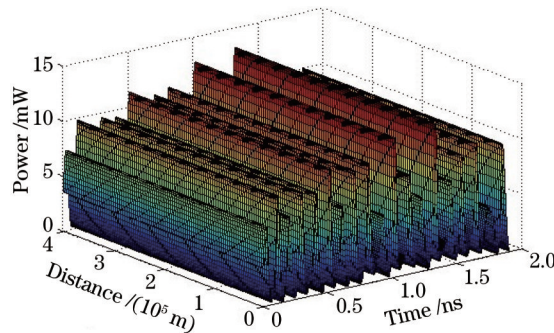


图9 非线性对混沌信号影响三维图

Fig.9 Three-dimensional image of effects of nonlinearity on chaotic signals

3.3 色散和非线性共同作用对混沌信号的影响

图10(a)~(c)分别是RL1混沌信号经光纤传输100、300、500 km后,色散和非线性共同作用对混沌信号的影响,黑线为传输前的混沌信号,红线为传输后的混沌信号。当只有色散作用时,混沌信号变化还是较平的

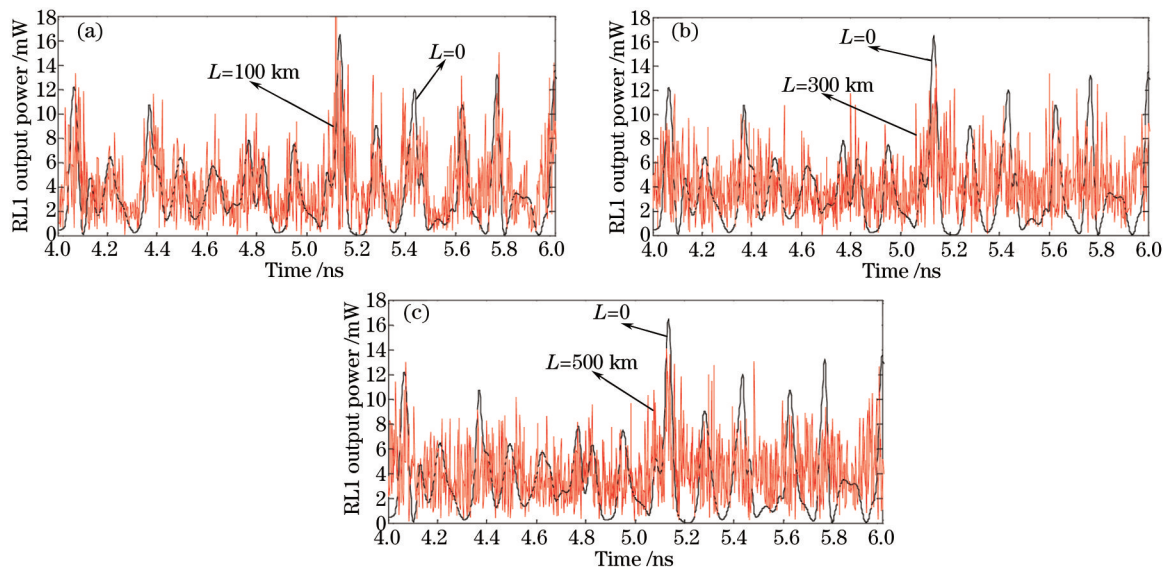


图10 传输不同距离的色散和非线性对混沌信号的影响。(a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

Fig.10 Chaotic signals with dispersion and nonlinearity after transmission for (a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

滑的,但当色散和非线性共同作用时,从图可知,混沌信号迅速发生很大变化,在原来色散的基础上产生了很多毛刺,几乎湮没了原来的混沌信号。图 11(a)~(c)是在色散和非线性共同作用下混沌信号传输 100、300、500 km 前、后同步图,从图中可以看出,随着距离的增加,其幅值分布越来越分散,并且比色散单独作用时分散得多,也逐渐远离“ $y=x$ ”这条直线。所以随着距离的增加,混沌信号同步性也迅速变差,导致了解调信息质量的急剧恶化。

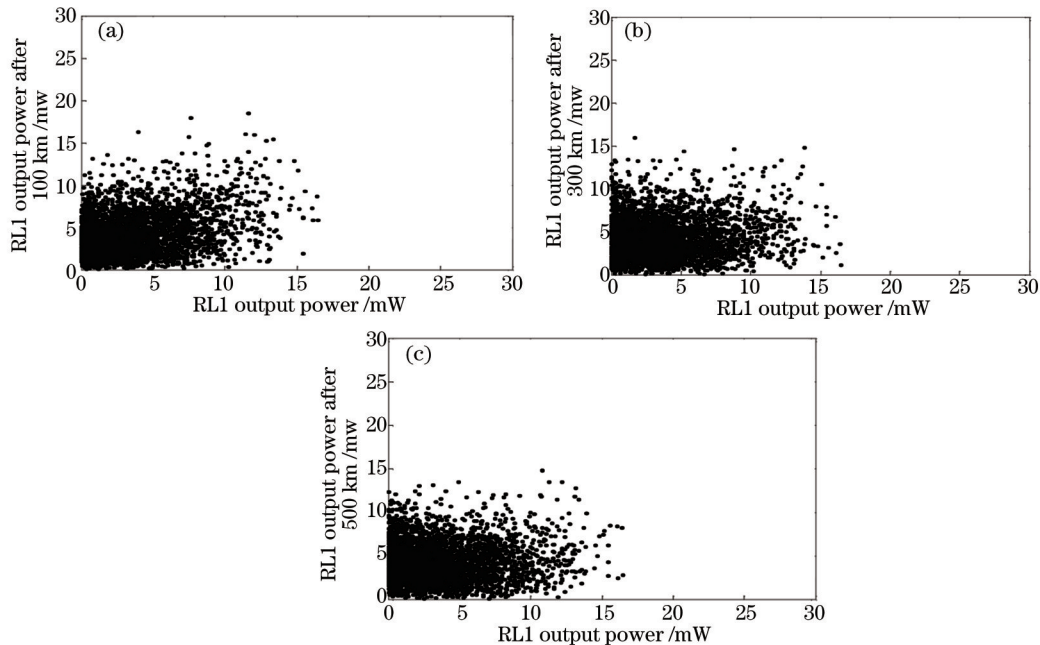


图 11 色散和非线性前后同步图。(a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

Fig.11 Synchronization graphs with dispersion and nonlinearity after transmission for (a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

图 12 是在色散和非线性共同作用下,随着距离的增加,同步误差的变化情况。如图 12 所示,在 0~5 km,同步误差迅速增大到 0.32;在 5~500 km,同步误差从 0.32 逐渐增加到 0.6。由此可见,在非线性和色散的共同作用下,在 0~5 km 导致的混沌信号变化要比只在色散的作用下的变化大得多。那是因为在 0~5 km(在色散同时作用下),非线性导致混沌信号的迅速变化,也导致了同步误差的急剧增大。

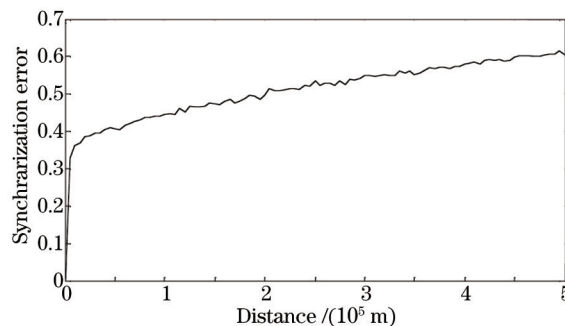


图 12 同步误差随距离的变化

Fig.12 Synchronization changes with distance

4 色散和非线性对解调信息质量的影响

4.1 色散对解调信息质量的影响

图 13(a)是 2 GHz 的正弦信号,(b)是 RL1 混沌信号,(c)是正弦信号通过混沌隐藏的方式隐藏到了 RL1 混沌信号中。图 14(a)~(c)分别是携带信息的混沌信号(黑线为传输前的混沌信号,红线为传输后的混沌信号)在色散作用下,经光纤传输 100、300、500 km 前后的波形图。图 15(a)~(c)是相应的解调出的 2 GHz 正弦信号(经过 3 阶 Butterworth 带通滤波器滤波)。可以看出,解调信息的质量依次变差,但到 500 km 仍可解调出要传输的信息。

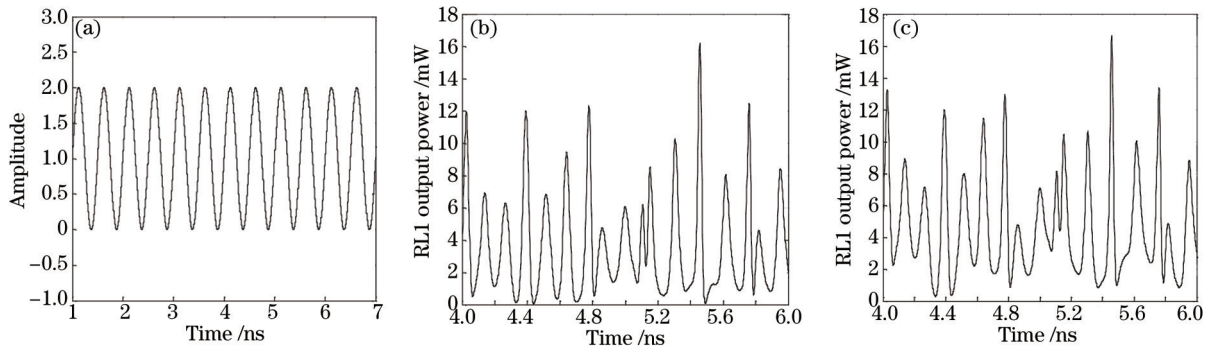


图13 (a) 2 GHz模拟信号; (b) RL1混沌信号; (c) 隐藏信息的混沌信号

Fig.13 2 GHz analog signal; (b) chaotic signal of RL1; (c) chaotic signal with hidden message

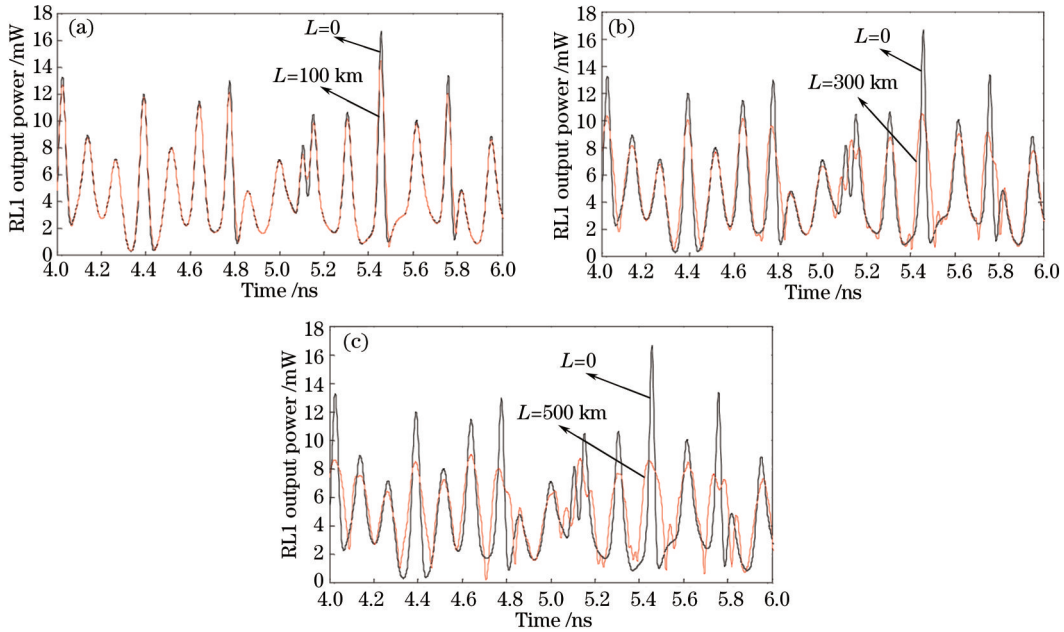


图14 传输不同距离后色散对隐藏信息的混沌信号影响。(a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

Fig.14 Chaotic signal with hidden message with dispersion after transmission for (a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

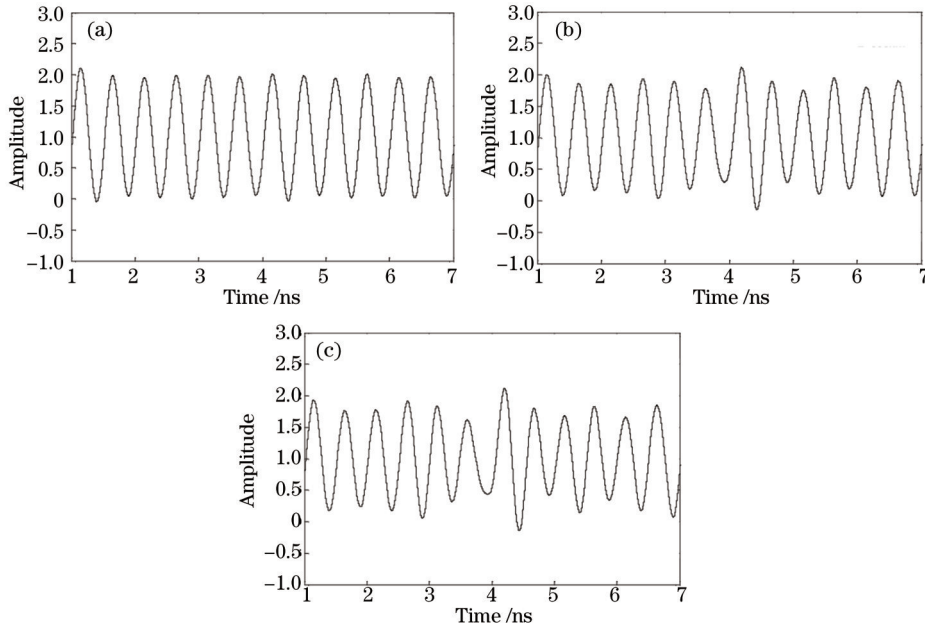


图15 传输不同距离后色散作用下解调出的信息。(a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

Fig.15 Demodulated with message with dispersion after transmission for (a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

图 16 是解调信息的信噪比(SNR)随距离的变化曲线,图中显示,信噪比从距离为 0 时的 14 dB 逐渐下降到 500 km 时的-8 dB。解调出的信息质量越来越差。

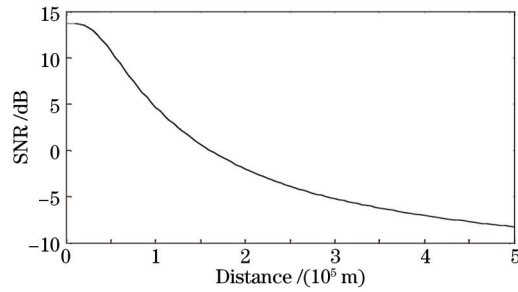


图 16 解调信号的信噪比随距离的变化

Fig.16 SNR of demodulated message changes with distance

4.2 色散和非线性共同作用对解调信息的影响

图 17 的(a)~(c)是携带信息的混沌信号,在色散和非线性的共同作用下,经光纤传输 100、300、500 km 前后的波形图,黑线为传输前的混沌信号,红线为传输后的混沌信号。图 18(a)~(c)为相应的解调出的 2 GHz 的正弦信号(经 3 阶 Butterworth 带通滤波器滤波)。图中显示,当传输 100 km 时可以解调出所传输的信息,但传输 300 km 时,解调出的信息已经失真,500 km 时同样失真。

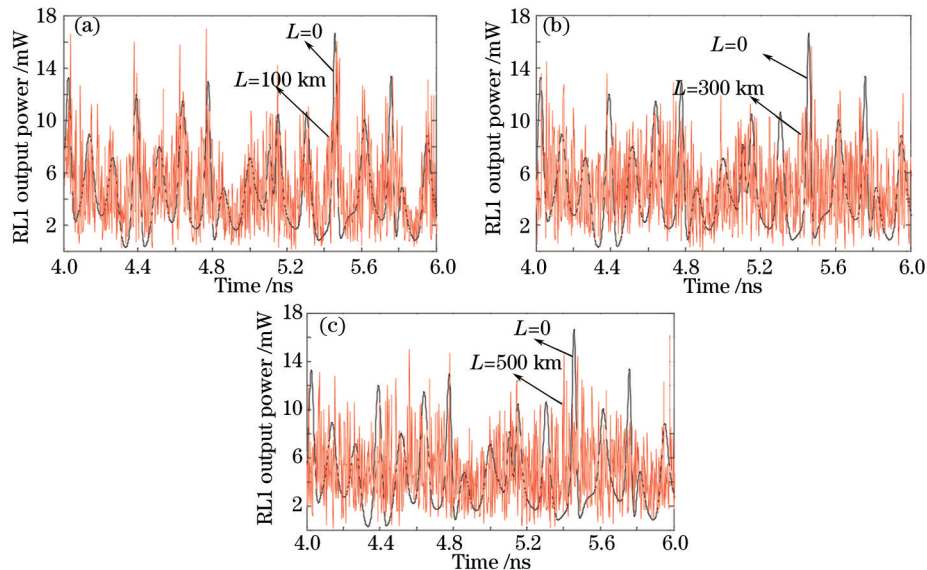


图 17 传输不同距离后色散和非线性对隐藏信息的混沌信号的影响。(a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

Fig.17 Chaotic signal with hidden message with dispersion and nonlinearity after transmission for

(a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

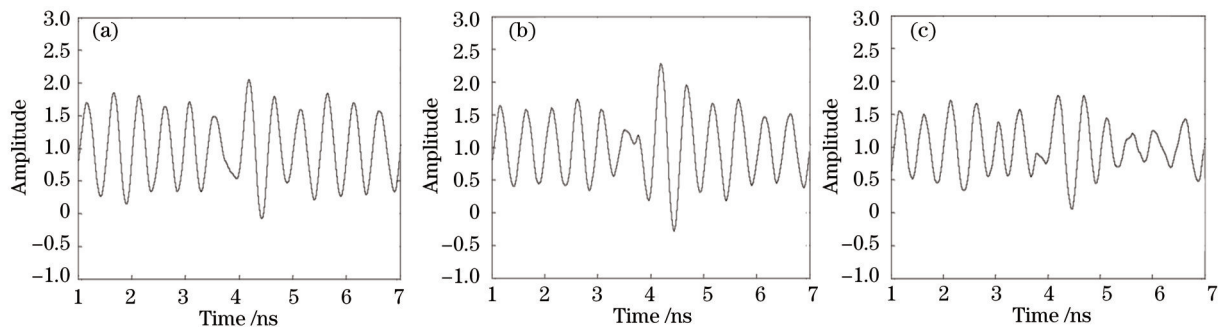


图 18 色散和非线性作用下解调出的信息。(a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

Fig.18 Demodulated message with dispersion and nonlinearity after transmission for (a) 100 km; (b) 300 km; (c) 500 km

图 19 是解调信息的信噪比随距离的变化曲线,从图中可以看出,传输 300 km 时信噪比降到了-9.3 dB,而到 500 km 时,信噪比降则降到-10 dB,已经解调不出需要传输的信息了。

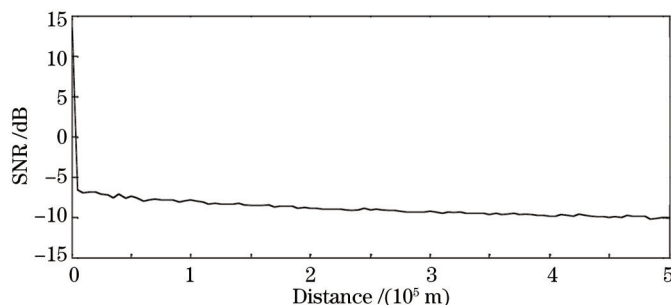


图 19 色散和非线性作用下解调信号的信噪比随距离的变化

Fig.19 SNR of demodulated message changes with distance under the combination action of dispersion and nonlinearity

5 结 论

在新型三激光器混沌通信系统的基础上,研究了色散和非线性对混沌信号的影响。随着传输距离的增加,色散导致混沌信号展宽和衰减,使 RL1、RL2 混沌信号的同步性变差;非线性对混沌信号的时域波形没有影响,不会影响混沌信号的同步性;二者共同作用,可迅速导致混沌信号发生变化,同步误差迅速变大。并且在色散单独作用时,经光纤传输 500 km 的信息可以解调出来,而在色散和非线性的共同作用下,经光纤传输 300km 的信息已经解调不出来了。在实际光信道中,可每隔 250 km 放置一个光纤放大器,用来弥补光纤的功率损耗;同时还需要加色散补偿器和再生中继,另外,光纤的非线性管理与非线性光纤耦合器可有效抑制非线性引起的系统性能恶化。这些技术都可有效提高混沌信号的同步性,从而提高信息解调的质量。

参 考 文 献

- Ohtsubo J. Synchronization of chaotic oscillations in semiconductor lasers and its application to secure communications [C]. CLEO 2001, 2001, 2: 704.
- Pisarchik A N, Ruiz-Oliveras F R. Optical chaotic communication using generalized and complete synchronization[J]. IEEE J Quantum Electron, 2010, 46(3): 279.
- Wu Jiagui, Wu Zhengmao, Lin Xiaodong, *et al.*. Theoretical model and characteristics investigations of dual-channel optical chaotic communication system[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 4(9): 4170.
吴加贵, 正茂, 林晓东, 等. 双信道光混沌通信系统的理论模型及性能研究[J]. 物理学报, 2005, 54(9): 4170.
- Ding Ling, Wu Zhengmao, Wu Jiagui, *et al.*. Unidirectional open-loop chaotic synchronization communication based on a semiconductor laser with double optical feedback[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(1): 014212.
丁灵, 吴正茂, 吴加贵, 等. 基于双光反馈半导体激光器的单向开环混沌同步通信[J]. 物理学报, 2012, 61(1): 014212.
- Pecora Louis M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Phys Rev Lett, 1990, 64(8): 821.
- Carroll T L, Pecora Louis M. Synchronizing chaotic circuits[J]. IEEE Trans Circuits and Systems, 1991, 38(4): 453.
- Arena P, Baglio S, Fortuna L. SC-CNN based systems to realize a class of autonomous and coupled chaotic circuits[C]. ISCAS'97, 1997, 1: 581.
- Bogris A, Argyris A, Kanakidis D. Transmission performance of a chaotic communication system consisting of semiconductor lasers with electro-optical feedback[C]. ECOC 2006, 2006.
- Uchida A, Ogawa T, Sato T. Synchronization of chaos in two microchip lasers: comparison of a master-slave type with a mutually coupled type[C]. EQEC 1998, 1998. 78.
- Wu Jiagui, Wu Zhengmao, Liu Ruran, *et al.*. Simulation of bidirectional long-distance chaos communication performance in a novel fiber-optic chaos synchronization system[J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(3): 461.
- Shen Cuili, Ye Huiying, Wei Fupeng, *et al.*. Analysis of synchronization in new three-laser scheme[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 101401.
申翠丽, 叶会英, 魏富鹏, 等. 新型三激光器结构的混沌同步特性[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 101401.
- Valerio Annovazzi-Lodi. Private message transmission by common driving of two chaotic lasers[J]. IEEE J Quantum Electron, 2010, 46(2): 258-264.
- Argyris A, Syvridis D. Chaos-based communication at high bit rates using commercial fiber-optic links[J]. Nature, 2005, 438(7066): 343.

- 14 Adonis Bogris, Dimitris Kanakidis, Apostolos Argyris, *et al.*. Performance characterization of a closed-loop chaotic communication system including fiber transmission in dispersion shifted fibers[J]. IEEE J Quantum Electron, 2004, 40(9): 1326.
- 15 Fan Zhang, Pak L Chu. Effect of transmission fiber on chaos communication system based on erbium-doped fiber ring laser[J]. J Lightwave Technol, 2003, 21(12): 3334.
- 16 Al-Dabagh SY, Abdalla M Sh. Numerical solutions aspect of nonlinear Schrödinger equation in monomode optical fiber [C]. ICTTA'06, 2006, 2: 2099.
- 17 Zhang Jianzhong. Theoretical Investigation of the Effects of Fiber Channel on Optical Chaotic Secure Communication [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. 13.
张建忠. 光纤信道对激光混沌保密通信影响的理论研究[D]. 太原: 大原理工大学, 2008. 13.
- 18 M Y Hamza, S Tariq. Split step Fourier method based pulse propagation model for nonlinear fiber optics[C]. ICEE'07, 2007.
- 19 Jia-ming Liu, How-foo Chen, Shuo Tang. Synchronized chaotic optical communications at high bit rates[J]. IEEE J Quantum Electron, 2002, 38(9): 1184.